

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 2017

Sonderdruck  
Seiten 143–149



J. CRAMER Verlag • Braunschweig  
2018

## Herausforderungen und Chancen für ein europäisches Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Netz\*

MICHAEL KURRAT

Institut für Hochspannungstechnik und El. Energieanlagen, TU Braunschweig  
Schleinitzstraße 23, DE-38106 Braunschweig,  
E-Mail: m.kurrat@tu-braunschweig.de

Im Jahr 2009 verpflichteten sich die europäischen Regierungen, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um bis zu 80% zu reduzieren. Folglich wurde der Einsatz erneuerbarer Energien stark gefördert, so dass der Ausbau des bestehenden AC-Netzes notwendig wurde. Mehrere Verbände überlegen, ob stattdessen der Aufbau eines Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)-Netzes vorteilhaft wäre. Damit stehen die Möglichkeiten und Herausforderungen im Zusammenhang mit der Installation eines europäischen HGÜ-Netzes im Fokus einer aktuellen Diskussion in Technik und Gesellschaft. Zur Zielerreichung sollte die am besten geeignete Technologie ausgewählt und umgesetzt werden. Dafür sind die bisherigen Erfahrungen von HGÜ-Anwendungen und bestehenden Projekten zu sammeln und auszuwerten.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Modelle sowohl für Offshore- als auch für „Supernetze“ entwickelt. Diese stellen aus finanzieller Sicht eine enorme Herausforderung dar, da große Investitionen erforderlich sind. Aus technischer Sicht sind wichtige Forschungsarbeiten für Gleichspannungsregelungs- und Schutzstrategien erforderlich. Die Veröffentlichung der „HVDC Grid Codes“ soll die Energieliberalisierung erleichtern und stellt einen ersten Schritt in Richtung einer europäischen Energieunion dar. Allerdings sind die Anforderungen noch nicht in allen Ländern vollständig verbindlich. Es wird nicht erwartet, dass ein „Supernetz“ in einem Stück geplant und umgesetzt wird, sondern dass es sich organisch entwickelt. In diesem Sinne wäre die Installation eines Offshore-Netzes allein sehr risikoreich. Vielmehr sind Verknüpfungen mit den vorhandenen Onshore-Netzen erforderlich, um die Integration einer großen Zahl von Offshore-Windparks zu ermöglichen. Im Augenblick sind die Analysen, die

---

\* Der Vortrag wurde am 10.01.2017 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

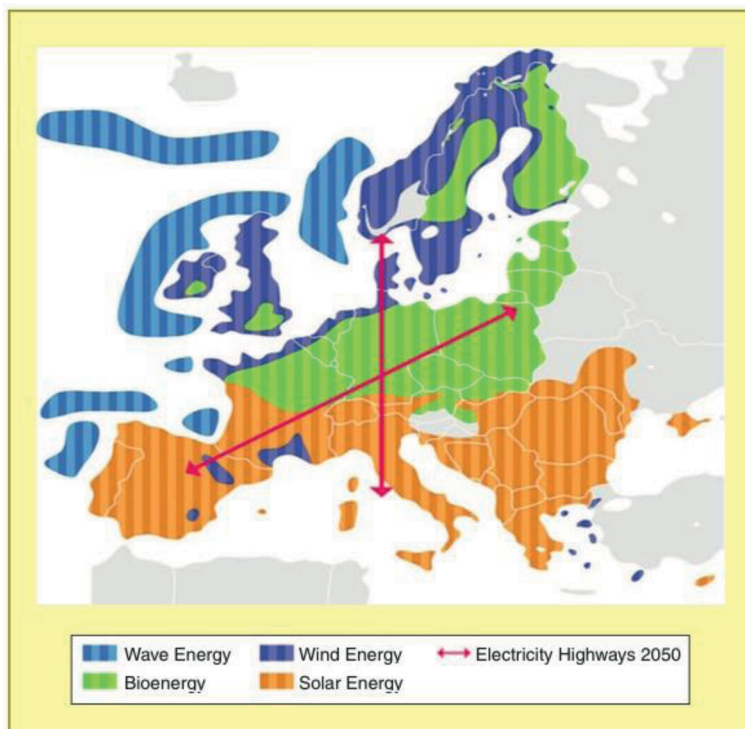


Abb. 1: Lage von erneuerbaren Energiequellen [3]

sich auf den gesamten europäischen Raum konzentrieren, sehr unterschiedlich und werden kontrovers diskutiert. Eine Lösung zur Verbesserung der vorgeschlagenen Netzarchitekturen und zur Verabschiedung gemeinsamer Ziele wäre eine intensive Zusammenarbeit zwischen bestehenden Verbänden und beteiligten europäischen Ländern.

Eine der aktuellen Herausforderungen des europäischen Übertragungsnetzes ist die Integration einer großen Anzahl erneuerbarer Energiequellen (RES), wie z.B. Offshore-Windparks und Photovoltaik, in das Stromnetz [1]. Diese befinden sich oft weit entfernt von Bevölkerungs- und Industriezentren (siehe Abb. 1). Die meisten der erneuerbaren Energien befinden sich weltweit gesehen in abgelegenen Gebieten wie Meeren, unbewohnten Regionen, Wüsten und Inseln. Um den Einsatz dieser nachhaltigen Ressourcen zu optimieren, ist häufig der Bau neuer Stromnetze erforderlich. Dabei hängt die Wahl der Übertragungstechnik von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. soziale Einflüsse, Umweltauswirkungen sowie technische und finanzielle Kriterien [2].

Seit mehr als hundert Jahren ist die Hochspannungs-Wechselstrom-(HVAC)-Technologie das Rückgrat der Energieübertragung. Mit zunehmender Größe der Anlagen und der Liberalisierung in der Energiewirtschaft gewinnt die HGÜ-Technologie an Bedeutung [4]. Aufgrund von Blindleistungsbegrenzungen ist die Übertragung mit Wechselstromkabeln über weite Strecken nicht realisierbar, da die Übertragungsverluste zu hoch sind. HGÜ ist eine effiziente Technologie, die entwickelt wurde, um große Mengen Strom über lange Übertragungswege mit geringeren Verlusten als ein herkömmliches Wechselstromsystem zu transportieren. In allgemeinen Anwendungen kann mit einer HGÜ-Strecke mehr Leistung als bei Wechselstrom übertragen werden. Dadurch kann das Profil der Pylone und der Verkabelung reduziert werden, was sowohl Geld als auch Land spart. HGÜ ermöglicht auch die Stromübertragung zwischen Netzen, die mit unterschiedlichen Frequenzen betrieben werden, wodurch die Stabilität und Zuverlässigkeit des elektrischen Stromnetzes insgesamt verbessert wird [5]. Diese und weitere Vorteile haben zu einer breiteren Nutzung der HGÜ-Technologie geführt. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurden weltweit zahlreiche HGÜ-Verbindungen für die Verbindung zwischen Ländern, die Integration grüner Energien in das Wechselstromnetz, die Übertragung großer Leistungen von entfernten Energiequellen und die Versorgung mit elektrischer Energie von Offshore-Plattformen für Öl und Gas installiert. Seekabel wurden entwickelt, um Energie über geografische Hindernisse wie Gewässer und Meere hinweg und über große Entfernungen zu übertragen.

Verschiedene Ausführungen von HGÜ-Technologien sind heute verfügbar. Hierbei werden entweder Voltage Source Converter (VSC) oder Line Commutated Converter (LCC) verwendet. LCC ist eine ausgereifte Technologie, die in vielen HGÜ-Projekten zur Übertragung sehr großer Leistungen eingesetzt wird. Der VSC befindet sich noch in der Entwicklung und ist aber schon heute die bevorzugte Technologie für die Verbindung von Inselnetzen, wie z.B. Offshore-Windparks, mit dem Stromnetz. Das Hauptmerkmal ist die kontinuierliche und unabhängige Regelung von Wirk- und Blindleistung.

Die rasante Entwicklung der HGÜ-Technologie führte zu einer neuen Idee für das elektrische Stromnetz: dem HGÜ-Supernetz. Auf dem Weg zu einem europäischen Supernetz gibt es zahlreiche Herausforderungen, aber auch viele Chancen für eine europäische Energiewirtschaft. Einen ersten Eindruck gibt ein Überblick über bestehende und geplante Projekte und deren wirtschaftliche Aspekte. Es liegen verschiedene Studien zur Installation zukünftiger HGÜ-Netze in Europa vor, darunter auch der deutsche Netzentwicklungsplan. Die HVDC Grid Codes bilden die Grundlage für die europaweite technische Standardisierung. Daran muss sich die Umsetzung eines europäischen Supernetzes messen lassen. Die Konzepte der Projektgruppen für HGÜ-Offshore- und Onshore-Supernetze zeigen einige mögliche Perspektiven für die zukünftige Strategie einer europäischen Energiewirtschaft auf.

Für die Energieforschung stellen sich vor dem Hintergrund der Supernetze folgende Fragen:

1. Welche Technologien und Topologien eignen sich für ein HGÜ-Netz?
2. Wie gut ist Europa durch bestehende HGÜ-Projekte und politische Rahmenbedingungen auf ein Supernetz vorbereitet?
3. Welches der verfügbaren Netzkonzepte ist vorteilhaft und erleichtert die Umsetzung?
4. Was sind die größten Hindernisse bei der Installation eines HGÜ-Netzes in Europa?

Als Antwort auf die erste Frage, kann gesagt werden, dass die bevorzugte Technologie zur Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit des zukünftigen HGÜ-Netzes zweifellos der VSC ist. Die Leistungskapazitäten und Spannungsniveaus von VSC-basierten HGÜ-Systemen sind niedriger als die von LCC-Systemen. Es wird jedoch erwartet, dass in naher Zukunft deutlich höhere Werte erreicht werden. Darüber hinaus können VSC in Kombination mit Multi-Terminal-Topologien eingesetzt werden. Diese gelten als die am besten geeignete Technologie für die Implementierung eines vermaschten HGÜ-Netzes. Multi-Terminal-Systeme, bei denen alle Konverter auf ein gemeinsames HGÜ-System zugreifen, sind preisgünstiger als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Damit sind keine Umwege über das HVAC-Netz erforderlich und es werden weniger Konverter-Stationen benötigt und zusätzliche Verluste vermieden. Darüber hinaus bieten Multi-Terminal-Netze den Vorteil, dass sie im Falle eines Fehlers an einem Kabel alternative Pfade für die Stromflüsse bereitstellen.

In Europa wurden im Laufe der Jahre mehrere Projekte realisiert. Weitere Projekte befinden sich im Bau oder sind bereits in Planung. Hauptziel ist es, die Übertragungskapazität des HVAC-Netzes zu erhöhen, um die Integration erneuerbarer Energien zu erleichtern, den Energieaustausch zwischen den europäischen Staaten zu verbessern und damit eine bessere Liberalisierung des Energiemarktes zu erreichen. Fortschritte auf dem Weg zur Vollendung einer Energieunion wurden durch die Veröffentlichung der HGÜ Grid Codes erzielt. Dennoch sind weitere Verbesserungen und genauere Anforderungen erforderlich.

Heute stehen verschiedene Netzkonzepte zur Verfügung. Es wird erwartet, dass das HGÜ-Netz organisch aufgebaut wird, so dass bestehende HGÜ-Verbindungen und Verbindungsleitungen in das europäische Netz einbezogen werden. Um Fehlentwicklungen zu vermeiden, wäre eine kurzfristige Einigung über die wahrscheinlichste Ausgestaltung des zukünftigen Netzes wünschenswert. Der Bau eines Offshore-Netzes wäre vorteilhaft, da es der erste Meilenstein auf dem Weg zu einem europäischen Supernetz sein könnte. In diesem Zusammenhang dürfen Konzepte, die sich nur auf Offshore-Netze konzentrieren, entweder in der Nordsee oder im Mittelmeer, nur als Teillösungen angesehen werden. Gleiches



Abb. 2: Friends of the Supergrid: Szenario 2050 [9]

gilt für diejenigen, die die Notwendigkeit von Upgrades und Single-Links oder nur Onshore-Grids in Betracht ziehen, wie im Falle der TYNDP- und Greenpeace-Szenarien [6, 7]. Das optimale Modell basiert auf der Analyse von beiden Konzepten, Onshore- und Offshore-Netzen. In diesem Sinne erweist sich der von „Friends of the Supergrid“ [8] entwickelte Entwurf als ein vielversprechendes Konzept. Es wird erwartet, dass die Installation des Netzes in drei Phasen erfolgen wird, wobei die erste Phase die Installation eines Offshore-Netzes in Nordeuropa, die zweite Phase die Ausdehnung auf Mitteleuropa und schließlich die Integration von Solarstrom aus externen Quellen in Afrika und im Nahen Osten umfasst. Bis 2050 soll das Supergrid dann auf die gesamte EU ausgedehnt und Solarenergie aus Nordafrika und dem Mittleren Osten in das Netz integriert sein (siehe Abb. 2) [9].

Hier ist auch die Vision DESERTEC [10] zu benennen. Dabei geht es allerdings um die Ausdehnung der europäischen Systeme auf benachbarte Kontinente.

Neben den vielen gesellschaftlichen, finanziellen und politischen Herausforderungen bieten die technischen Anforderungen der HGÜ-Netze viele Forschungsaufgaben. So ist eine vollkommen neue Schutz- und Schalttechnik für HGÜ-Netze zu entwickeln. Die traditionelle HVAC-Schutzstrategie kann nicht bei HGÜ angewendet werden. Hybrid-Schalterkonzepte bieten eine geeignete technische Lösungsmöglichkeit. Die rückführbare Messung der Übertragungsleistung und die Abrechnung der enormen Energieströme ist eine metrologische Herausforderung, der sich die PTB Braunschweig bereits widmet [11]

Das künftige HGÜ-Netz ist in der Lage, deutlich höhere Leistungen als das gegenwärtige HVAC-System zu übertragen. Dies ist, zusammen mit der Weiterentwicklung von Multi-Terminal-VSC-Systemen für vermaschte Netze, eine anspruchsvolle regelungstechnische Aufgabe [4]. Insbesondere die Realisierung der gewünschten geringen Übertragungsverluste ist eine technische Herausforderung an die Leistungselektronik [12].

Sowohl die detaillierte Bewertung von Konverter-Technologien, als auch die Analyse von HVDC Netz Konfigurationen hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Kriterien ist essentiell für die Entwicklung eines europäischen Supernetzes. Hierbei sollten auch Erfahrungen von Anlagenbetreibern und -herstellern berücksichtigt werden [13].

Auch die Entwicklung von Simulationsmodellen ist ein wichtiger Bestandteil der Planung, Auslegung und Umsetzung von Multi-Terminal Topologien. Mit Hilfe von Studien können so verschiedene Betriebs- und Fehlerfälle untersucht werden [14].

Der Aufbau von HGÜ-Netzen erfordert ohne Zweifel große Investitionen und Anstrengungen. Einige europäische Länder sind noch nicht bereit, diese Herausforderungen in Angriff zu nehmen. Auf der anderen Seite steht die Erhaltung der zahlreichen Arbeitsplätze, die mit der Energiebranche direkt oder indirekt verbunden sind, durch technologische Weiterentwicklung in Europa. Die Tatsache, dass verschiedene Länder mit unterschiedlichen politischen und kulturellen Rahmenbedingungen beteiligt sind, erschwert die Umsetzung eines europäischen Supernetzes. Es ist aber im Sinne aller engagierten Nationen, die Zusammenarbeit der Länder und der Verbände für europäische Großprojekte zum Vorteil der Gesellschaft voranzutreiben.

Weitere Informationen zu diesem Beitrag liefert die Veröffentlichung [15].

## Literatur

- [1] SIMÕES, M.G, R. ROCHE, E. KYRIAKIDES, A. MIRAOU, B. BLUNIER, K. MCBEE et al. (2011): Smartgrid technologies and progress in Europe and the USA.



- IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc. 2011. p. 383–90.
- [2] L'ABBATE, A., G. MIGLIAVACCA, U. HÄGER, C. REHTANZ, S. RÜBERG, H. FERREIRA et al. (2010): The role of facts and HVDC in the future PAN-European transmission system development. – 9th IET Int. Conf. AC DC Power Transm. (ACDC 2010) p.O16–O16.
- [3] SANCHIS, G. , B. BETRAOUI, R. PESTANA, B. DE CLERCQ, G. MIGLIAVACCA, M. CZERNIE & M. PAUN (2015): “The Corridors of Power 2050,” no. february.
- [4] BIANCHI, F.D., J. L. DOMÍNGUEZ-GARCÍA & O. GOMIS-BELLMUNT (2016): Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: a review. – *Renew Sustain Energy Rev* **55**: 1055–68.
- [5] SÁNCHEZ S.A., E.A. TORRES & R.A. KALID (2015): Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. – *Renew Sustain Energy Rev* **49**: 278–90.
- [6] ENTSO-E TYNDP (2014): Ten Year Network Development Plan 2014.
- [7] Greenpeace (2014): PowE[R] 2030. A European Grid for 3/4 Renewable Electricity by 2030.
- [8] Friends of the Supergrid, Roadmap to the Supergrid Technologies. ([http://Www.Friendsofthesupergrid.Eu/Position\\_Papers\\_Proposals.AspX](http://Www.Friendsofthesupergrid.Eu/Position_Papers_Proposals.AspX)). March 2013. p. 1–107.
- [9] AGUADO A. (2011): “Towards a European supergrid,” *Power Syst. Comput. Conf.*
- [10] DESERTEC. DESERTEC Foundation. (<http://www.desertec.org>).
- [11] PTB-Mitteilungen. Metrologie für die Zukunft. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven. 2012
- [12] BINDER, O., J. MEISNER, J. SCHÜTZE & M. KURRAT (2015): HVDC Test Environment for Loss Measurements on Multilevel Converter Modules. *IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, pp. 61–66.
- [13] HOFFMANN, M. (2018): Innovative Offshore Wind Farm Connection Concepts Using Different HVDC Converter Technologies.
- [14] XU, L., L. FAN & Z. MIAO (2012): Modeling and Simulations of Multi-Terminal HVDC for Wind Power Delivery.
- [15] PIERRI, E., O. BINDER, N.G.A. HEMDAN & M. KURRAT (2017): Challenges and Opportunities for a European HVDC grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier.